# 重合格子法を用いた振動する円柱周りの流れの解析

Flow Analysis Around Oscillating Circular Cylinder Using Overset Grid Method

小笠原 和也,電通大院,東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail: oga-k@kuroda.mce.uec.ac.jp 黒 田 成昭,電通大 ,東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail: kuroda@mce.uec.ac.jp Kazuya Ogasawara, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan Shigeaki Kuroda, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

Flow around an elastically supported oscillating circular cylinder in a uniform flow was studied by using the two-dimensional finite difference calculation based on MAC method with overset grid method. The effects on the flow of the range of reduced velocities from Vr=1.0 to 3.5 at the Reynolds number Re=1000 and the Scruton number Sc=0.0 are studied numerically.

# 1.緒論

ー様流中に置かれた物体は,物体表面上で流れの剥離が生 じることにより,後流領域において周期性を持った後流渦が 形成される.このような剥離,後流渦を伴った物体において は,物体とその周りの流れの相互干渉により,渦励振やギャ ロッピング・フラッタといった自励振動が生じる.そこで, 工学的見地における重要さから,多くの研究者により古くか ら様々な研究が行われ,近年においても研究の需要が高まっ ているが,格子形成の必要がある差分法においては格子の再 分割が必要になるなど計算に困難を伴う場合が多い<sup>(1)</sup>.

また,剥離を伴う物体を複数個配列した場合には,流れが 物体をよぎる時に剥離域からの相互干渉が流れの状態を複 雑にするため,単独の場合の結果と大きく異なる事が知られ ている<sup>(2)</sup>.

そこで移動問題解析や,複数物体の解析を行う場合,物体 1つ1つに格子を張り計算を行う重合格子法を用いることに より,移動時の格子再形成の煩雑さや任意の個数での格子形 成の労力の軽減が期待できる.

本研究では,一様流中に弾性支持した円柱を重合格子法に より計算し,重合格子法の移動問題における有用性を調べた.

2.記号の説明

- *d* : 円柱直径(代表長さ)
- x,y : 振動振幅(流れ,垂直方向)
  - M : 円柱質量
  - U : 速度
  - P : 圧力
  - U<sub>0</sub> : 代表速度
  - K : ばね定数
  - C : 減衰係数

 $C_D$ ,  $C_L$ : 抗力・揚力係数

- *Re* : レイノルズ数(=*Ud*/ )
  - : 流体密度
  - : 動粘性係数
  - : 対数減衰率
  - fa : 円柱の静止時の渦放出周波数
  - *f* : 円柱の固有振動数

- Sc
   :
   スクルートン数(=2M / d²)

   Vr
   :
   換算流速(=U/fd)
- 3.解析方法
- 3.1.解析モデル

Fig.1 に示したように,円柱は一様流中でばねとダンパに よって支持された2自由度の系とする.





3.2.流れの式

2次元非圧縮粘性流れの計算を Navier-Stokes 方程式(1)と連続の式(2)を用いて解析を行った.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\nabla P + \frac{1}{Re}\nabla^2 u$$
 (1)

 $D \equiv div \mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{2}$ 

$$\begin{cases}
M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = C_D \\
M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = C_L
\end{cases}$$
(3)

計算は MAC 法に基づいて行った.時間差分については一次精度の前進差分,空間微分項については二次精度の中心差分を,対流項については河村・桑原スキームを用いて離散化を行った.計算は速度,圧力ともに陰解法を用いて SOR 法で収束計算を行った.また,振動に伴う円柱の変位量は式(3)に示した運動方程式に4次精度の Runge-Kutta 法を用いて求めた.

3.3.格子形成

円柱とともに移動する格子(副格子と呼ぶ)は,半径方向に 不等分割で39点,周方向に等間隔で80点のO型格子とし, 計算空間全体を覆う格子(主格子と呼ぶ)はx方向に153点,y 方向に 145 点の直交格子とした.主格子は副格子に向かって 不等分割に格子を切り,副格子近傍では等間隔とした.



Fig.2 Geometry of grid

主格子と副格子の接続には,式(4)を用い,最小二乗法によって求めることにより物理量 q を補間した<sup>(3)</sup>.

$$q_{p} = a_{0} + a_{1}x + a_{2}y \tag{4}$$

境界条件としては,主格子の流入・側面部に遠方条件として u=1,v=0の一様流,出口部には Sommerfeld 放射条件を, 円柱表面での速度は式(3)から,圧力は法線方向の勾配が 0の Neumann 条件を与えた.

# 4.補間精度の検証

本計算法で用いた補間法について,精度の検証を行なった. その際に,副格子は強制的に移動させ,移動時の補間精度を 調べた.

$$F(x, y) = \sin x + \sin y \tag{5}$$

まず,主格子の各格子点に式(5)で物理量を与え,式(4)を 通して副格子に補間を行なった.補間した副格子上の値と, 補間点の座標から求めた式(5)の値との最大相対誤差のオー ダーは 10<sup>-4</sup> 程度であった.次に,副格子の各格子点に式(5) を与え,先ほどと同様に主格子上の補間点の相対誤差を求め たところ,やはり 10<sup>-4</sup> 程度のオーダーであった.この値は, 圧力の計算で用いた SOR 法の収束値と同程度であり,信頼 性が確認できたと考えられる.

#### 5. 弹性支持円柱

円柱の静止時の渦放出振動数 fa( 0.23)を基準とした共振 換算流速 Vr( 4.3)の約 1/2 付近において現れる 2 つのピーク を再現するために,換算流速 Vr を 1.0~3.5 まで変化させな がら円柱の応答振幅を求めた.

計算条件を Table.1 に示す.これらの値を無次元化し,2 次元計算を行った.

Table.1 Calculation parameters	
円柱直径	0.06(m)
円柱密度	7.86×10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> ):鉄
円柱質量	4.00(kg)
質量比	6.18
スクルートン数	0.0
一樣流速	$1.67 \times 10^{-2} (\text{m/s})$ : Re=1000

Table.1 Calculation parameters

Fig.3 に各換算流速における振動振幅を示す.

円柱は換算流速が 1.2 付近から流れ方向への振動が大きく 出始め,1.8 付近で一旦減少するが,約 2.2 を再びピークとす る 2 つの山を形成した.

第1の山(第1励域)は King<sup>(5)</sup>らによって報告されている, 流れ方向振動を起因とする円柱両側からの対渦の発生によ るものである.円柱の振動は,対渦のために流れに直角方向 に働く力が相殺されるために流れ方向振動が卓越する.

また,第2の山(第2励域)では円柱後流に発生する交互渦 と円柱が共振することで,流れ方向振動が大きくなる.

Fig.4 に各換算流速における流れ方向,流れに直角方向の 振動数と,円柱の固有振動数を示す.

円柱の振動数は,換算流速1.8 付近から固有振動数fの1/2 に乗り始めるロックイン状態となる.しかし1.8 付近では, 第1励域で現れる対渦と第2励域で現れる交互渦の相互干渉 によって,振動振幅が急激に落ち込んでいる.交互渦が安定 して放出されるようになると,交互渦に円柱の振動が引き込 まれ,ロックインのような状態となる<sup>(6)</sup>.

Fig.5 に換算流速 1.4 での軌跡と流れ場の様子を示す.

Fig.6 に換算流速 2.2 での軌跡と流れ場の様子を示す.

換算流速 1.4 での振動軌跡は流れ方向に伸びた楕円のよう な形を見せており,流れ場の渦構造においても第1励起特有 の対渦が確認できる.また,2.2 での振動軌跡は流れ方向に 伸びた8の字を描いている様子が分かり,さらに渦構造にお いても第2励起特有の円柱両側からの交互渦が確認できる.

これらの結果は,単一格子における計算結果と良く一致しており,本解析においても 1/2 共振換算流速域において発生する流れ方向振動の特性を再現でき,有用性を確認することができた.



Fig.3 Vibration amplitude of cylinder versus reduced velocity





Fig.5 Lissajous figure and Flow pattern of Vr=1.4



Fig.6 Lissajous figure and Flow pattern of Vr=2.2

6.4円柱における計算

次に,より現実的な計算の一例として,4円柱での計算を 行った.

Table.2 に計算条件を示す.

Table.2 Calculation parameters	
円柱直径	0.01(m)
円柱密度	2.69 × 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> ): アルミニウム
円柱質量	$6.33 \times 10^{-2}$ (kg)
質量比	2.12
減衰係数	0.204(N• s/m)
スクルートン数	0.68
換算流速	1.6 , 2.2
一樣流速	$2.21 \times 10^{-1} (\text{m/s})$ : Re=2200

Fig.7 に計算モデルを示す.円柱の中心間距離は 3*d* とし, 正方形配置とした.円柱は左上から順に*a*,*b*,*c*,*d*とする.



本解析の結果,円柱中心間距離が3.0における4円柱では, 一様に単独円柱とは異なる振動を起こした.



Fig.9 Lissajous figures



Streamline



Iso-pressure contour Fig.10 Flow pattern of T=76.8

# 6.1.換算流速1.6での計算

Fig.8 に各円柱の振動変位の時間変化を示す.縦軸の *a*,*b*, *c*,*d*はFig.7 の円柱に対応している.図中の赤線は無次元時 間 76.8 を表す.円柱の流れ方向振動は,完全には安定してい ないものの,*a*,*b*,*c*,*d*全てほぼ同位相で振動している.し かし,流れに垂直な方向の振動は乱れた波形となっており, 周期性は見られない.

Fig.9 に各円柱の振動軌跡を示す.前方に配置した円柱 a, b の軌跡に関しては,大きさには差が無いがそれぞれの形状 は異なっており,中心間距離 3.0 では単独円柱の挙動とは異 なる結果となった.また,後方に配置した円柱 c,d は直前 の円柱の後流の影響と,前方の2円柱間からの流れの影響を 相互的に受けるために大変乱れ,大きさも a,b と比べて比 較的大きなものとなっている.しかし,円柱の振動は一定と なっているわけではないので,軌跡の大きさは後方の円柱よ りも前方の円柱の方が大きくなることもある.

6.2.換算流速2.2での計算

Fig.11 に各円柱の振動変位の時間変化を示す.

Fig.12 に無次元時間 45.6 における流れ場を示す.

Fig.13 に無次元時間 46.8 における流れ場を示す.

無次元時間約 30 以降において各円柱の振動変位に注目し てみると,前方に配置した円柱 a,b は,上流側に向かいつ つ互い距離を狭めるといった動きを見せている.一方,後方 に配置した円柱 c, d は逆に下流に向かいつつ互いに遠ざか っている.時間が発展すると先ほどとは反対に,円柱 a, b は下流に向かいつつ向かいつつ互いに遠ざかる方向に,円柱 c, d は上流に向かいつつ互いに近づく振動をする.これは, 換算流速が1.6と大きく異なり,前方の円柱の流れに垂直方 向の振動が上下逆位相のために,間を流れ出た流れも振動し, 後方の円柱もその影響を大きく受け,上下逆位相の振動を行 なっているためである.これらの様子は,Fig.12,13からも はっきりと読み取れる.

# 7.結論

重合格子法を用いて流体励起振動する単独円柱周りの計算を行い,単一格子での計算と同様な1/2共振換算流速付近 で発生する流れ方向振動特性の第1励起と第2励起を再現で き,信頼性を確認することができた.

また,中心間距離が3.0 で正方形配置した4円柱について 解析を行った結果,各円柱が単独円柱とは異なる振動を起こ すことが分かった.また,その振動変位は換算流速に大きく 依存することが分かった.





Streamline



Iso-pressure contour Fig.12 Flow pattern of T=45.6





Iso-pressure contour Fig.13 Flow pattern of T=46.8

参考文献

- (1) 中島,松本,"重合格子法を用いた振動円柱周りの数値シ ミュレーション"第11回数値流体力学シンポジウム, pp.333-334.
- (2) 岡本 他,"弾性支持された角柱列まわりの流れに及ぼ す角柱間隔比の影響"日本機械学会論文集,64-617, B(1998), pp. 25-33.
- (3) 杉山 他,"重畳格子法を用いた移動物体周りの数値計算"第9回数値流体力学シンポジウム, pp. 119-120.
- (4) 岡島 他,"円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性" 日本機械学会論文集,65-635,B(1999),pp.2196-2203.
- (5) King, R. and Prosser, M. J., "On Vortex Excitation of Mode Piles in Water" J sound Vib, 29-2(1973), pp . 169-188.
- (6) 田中 他,"低流速における円柱の振動と流体力"機論,
   65-640, B(1999), pp. 3933-3940.
- (7) 西岡 他, "2 円柱の振動モードへの円柱間隔比の影響"日本機会学会講演論文集, No. 978-1(1997).